

考虑电容 ESR 的 Buck 变换器输出纹波电压精确建模*

皇金锋^{1,2}, 李林鸿¹, 李良井¹

(1. 陕西理工大学 电气工程学院, 陕西 汉中 723001; 2. 陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001)

摘要:针对 Buck 变换器传统输出纹波电压分析不够精确的问题,提出了考虑电容等效串联电阻(Equivalent Series Resistance, ESR)的纹波电压建模方法,较之传统的纹波电压分析方法,文中提出的建模方法不仅能反映其非线性本质特征,而且该建模结果具有较高的精度。仿真和实验结果验证了理论分析的正确性,研究结果可为高精度 Buck 变换器分析和设计提供理论依据。

关键词:ESR; Buck 变换器; 纹波电压; 精确建模

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.015.005

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2019)15-0029-05

Accurate modeling of output ripple voltage of Buck converter considering capacitor's ESR

Huang Jinfeng^{1,2}, Li Linhong¹, Li Liangjing¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shanxi, China.

2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, Shanxi, China)

Abstract: In view of the inaccuracy of the traditional output ripple voltage analysis of Buck converter, a ripple voltage modeling method considering equivalent series resistance (ESR) is proposed in this paper. Compared with the traditional ripple voltage analysis method, the proposed modeling method can not only reflect its non-linear essential characteristics, but also has high accuracy. The simulation and experimental results validate the correctness of the theoretical analysis. The research results can provide theoretical basis for the analysis and design of high-precision Buck converter.

Keywords: ESR, Buck converter, ripple voltage, accurate modeling

0 引言

Buck DC-DC 开关变换器被广泛应用航空航天设备、医疗设备、仪器仪表设备、光伏发电系统、LED 驱动等领域^[1-8]。随着电力电子技术的飞速发展,许多电子设备需要高精度 Buck 变换器,而输出纹波电压的精确建模是高精度变换器分析和参数优化设计的重要理论依据,因此有必要对 Buck 变换器输出纹波电压进行深入研究。

大量实验结果表明: Buck 变换器输出纹波电压和现有的纹波理论计算之间存在较大的误差,甚至出现了实验结果是现有理论计算结果的 2 倍,甚至更大的情况;现有的纹波电压理论已无法很好的指导高精度

Buck 变换器的分析和设计,因此需要对 Buck 变换器的纹波电压理论进行深入研究。

现有纹波电压理论无法指导高精度宽负载 Buck 变换器分析和设计的主要原因有两点,第一个主要原因是忽略了其非线性特征, Buck 变换器工作在开关状态,其固有的强非线性开关元件使其表现出非线性特征^[9-12],已有的文献通常将输出纹波电压近似为直线,这种近似必然导致实验结果和理论分析存在误差;第二个主要原因是忽略了 Buck 变换器的部分重要寄生参数,随着功率开关器件的飞速发展,器件的寄生参数对纹波电压的影响可忽略不计,但是 Buck 变换器输出滤波电容一般采用电解电容,由于电解电容存在较大的等效串联电阻 ESR,大量实验结果表明 ESR 对纹波电压有非常大的影响,因此忽略 ESR 是导致纹波电压误差大的另一个主

* 基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目(18JS021); 陕西理工大学人才启动基金(SLGQD1808)

要原因。基于以上分析可知,高精度 Buck 变换器的纹波电压分析需要考虑电容等效串联电阻 ESR 以及系统的非线性特征。

文中针对现有 Buck 变换器纹波电压计算结果不够精确的问题,以电感电流连续模式(CCM)为例,建立了考虑 ESR 时的变换器纹波电压精确模型,研究结果可为高精度 Buck 变换器的分析和优化设计提供理论依据。

1 Buck 变换器输出纹波电压精确建模

Buck 变换器的电路拓扑如图 1 所示。图 1 中, V_i 为输入电压、 v_o 为输出电压、 V_T 为功率开关管、 V_D 为续流二极管、 L 为滤波电感、滤波电容等效为理想电容 C 和其等效串联电阻 R_C 、 v_C 为理想电容 C 两端电压、 R 为负载电阻。

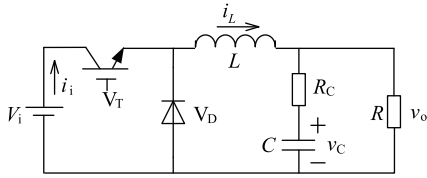


图 1 Buck 变换器

Fig. 1 Buck converter

由文献[8]可知,忽略寄生参数的 Buck 变换器工作在 CCM 时输出纹波电压 V_{pp} 为:

$$V_{pp}^{CCM} = \frac{V_o(V_i - V_o)}{8V_iLCf^2} \quad (1)$$

由公式(1)可知,工作在 CCM 的 Buck 变换器 V_{pp} 与 R 无关,且纹波电压与 ESR 大小无关,但仿真和实验结果表明 V_{pp} 与 R 和 R_C 有关。因此下面对 Buck 变换器的纹波电压 V_{pp} 进行建模分析。

Buck 变换器在工作在 CCM 时,开关管 V_T 导通和关断时的等效电路拓扑如图 2 所示。

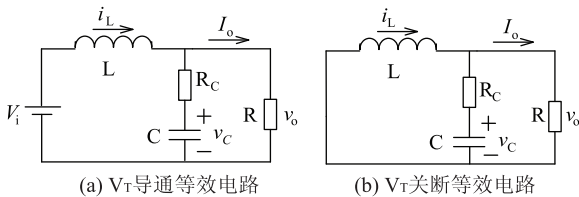


图 2 CCM 时的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of CCM

开关器件 V_T 处于通态 t_{on} 期间,设电感电流为 $i_{L1}(t)$,输出电压为 $v_{o1}(t)$,当 Buck 变换器工作在稳定状态时,由图 2(a)可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_{L1}(t)}{dt} = V_i - v_{o1}(t) \\ C \frac{dv_{o1}(t)}{dt} = \frac{Ri_{L1}(t)}{R + R_C} - \frac{(L + CRR_C)v_{o1}(t)}{L(R + R_C)} + \frac{CRR_C V_i}{L(R + R_C)} \end{cases} \quad (2)$$

求解式(2)可得:

$$\frac{d^2 v_{o1}(t)}{dt^2} + \frac{L + CRR_C}{LC(R + R_C)} \cdot \frac{dv_{o1}(t)}{dt} +$$

$$\frac{Rv_{o1}(t)}{LC(R + R_C)} = \frac{RV_i}{LC(R + R_C)} \quad (3)$$

式(3)为非齐次线性方程,其特征方程为:

$$s^2 + \frac{L + CRR_C}{LC(R + R_C)}s + \frac{R}{LC(R + R_C)} = 0 \quad (4)$$

求解式(4)可得:

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{\left(\frac{L + CRR_C}{2LC(R + R_C)}\right)^2 - \frac{R}{LC(R + R_C)}} - \frac{L + CRR_C}{2LC(R + R_C)} \quad (5)$$

开关管 V_T 导通时电路拓扑如图 2(a),对应图 3 中的 $t_0 \sim t_1$ 时间段。在该时间段内电感电流 $i_{L1}(t)$ 由最小值增加到最大值。在 $t_0 \sim t_1$ 时间段,当 $i_{L1}(t) < I_o$ 时,电容 C 和电感 L 同时给负载 R 供电,电容 C 处于放电状态,输出电压减小;当 $t = t_{11}$ 时 $i_{L1}(t_{11}) = I_o$,输出电压 $v_{o1}(t)$ 达到到最小值;当电感电流 $i_{L1}(t) > I_o$ 时,电容 C 充电,电感 L 继续给负载 R 供电,该阶段一直持续到 t_1 时刻。

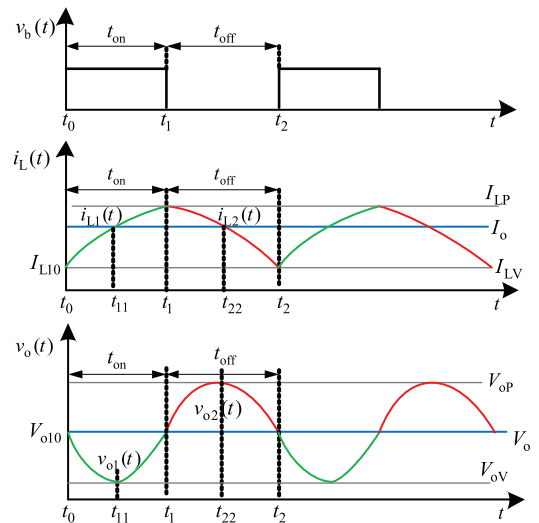


图 3 CCM 时工作波形

Fig. 3 Working waveform of CCM

开关管 V_T 关断电路拓扑如图 2(b),对应图 3 中的

$t_1 \sim t_2$ 时间段。电感电流 $i_{L2}(t)$ 由最大值减小到最小值。在此阶段,当 $i_{L2}(t) > I_o$ 时,电感 L 给负载 R 和电容 C 供电,电容 C 处于充电状态,输出电压 $v_{o2}(t)$ 增加;当 $t = t_{22}$ 时 $i_{L1}(t_{22}) = I_o$,输出电压 $v_{o2}(t)$ 达到最大值;随着 $i_{L2}(t)$ 继续减小,当 $i_{L2}(t) < I_o$ 时,电容 C 和电感 L 同时给负载 R 供电,电容 C 处于放电状态,输出电压 $v_{o2}(t)$ 减小,这一阶段持续到 t_2 时刻,接着下一个开关周期重复此前状态。

当 $R > \frac{L}{2CR_C + 2\sqrt{LC}}$ 时, Buck 变换器工作在欠阻尼状态,一般情况下变换器工作在此状态。求解式(3)可得输出电压 $v_{o1}(t)$ 在 t_{on} 阶段的瞬时表达式为:

$$v_{o1}(t) = e^{\alpha t} (k_1 \cos \beta t + k_2 \sin \beta t) + V_i \quad (6)$$

$$\text{式中 } \alpha = -\frac{L + CRR_C}{2LC(R + R_C)}, k_1 = v_{o1}(t_0) - V_i,$$

$$\beta = \sqrt{\frac{R}{LC(R + R_C)} - \left(\frac{L + CRR_C}{2LC(R + R_C)}\right)^2},$$

$$k_2 = \frac{Ri_{L1}(t_0)}{\beta C(R + R_C)} - \frac{v_{o1}(t_0)}{\beta C} \left(\frac{L + CRR_C}{L(R + R_C)} + \alpha C \right) + \frac{1}{\beta C} \left(\frac{CRR_C}{L(R + R_C)} + \alpha C \right) V_i。$$

将式(6)代入式(3)可得电感电流 $i_{L1}(t)$ 在 t_{on} 阶段的瞬时表达式为:

$$i_{L1}(t) = e^{\alpha t} \left(1 + \frac{R_C}{R} \right) \left[\left(\alpha Ck_2 - \beta Ck_1 + \frac{k_2(L + CRR_C)}{L(R + R_C)} \right) \cdot \sin \beta t + \left(\alpha Ck_1 + \beta Ck_2 + \frac{k_1(L + CRR_C)}{L(R + R_C)} \right) \cos \beta t \right] + \frac{V_i}{R} \quad (7)$$

V_T 关断 t_{off} 期间,对应的等效电路拓扑图 2(b),设此时电感电流为 $i_{L2}(t)$,输出电压为 $v_{o2}(t)$,当 Buck 变换器工作在稳定状态时,由图 2(b)可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_{L2}(t)}{dt} = -v_{o2}(t) \\ C \frac{dv_{o2}(t)}{dt} = \frac{Ri_{L2}(t)}{R + R_C} - \frac{(L + CRR_C)v_{o2}(t)}{L(R + R_C)} \end{cases} \quad (8)$$

求解式(8)可得 t_{off} 阶段输出电压 $v_{o2}(t)$ 为:

$$v_{o2}(t) = e^{\alpha(t-t_1)} [k_3 \cos \beta(t-t_1) + k_4 \sin \beta(t-t_1)] \quad (9)$$

$$\text{式中 } k_3 = e^{\alpha t_1} (k_1 \cos \beta t_1 + k_2 \sin \beta t_1) + V_i,$$

$$k_4 = \frac{v_{o1}(t_0) e^{\alpha(t_1-t_2)} - k_3 \cos \beta(t_2-t_1)}{\sin \beta(t_2-t_1)}。$$

将式(9)代入式(8)可得电感电流 $i_{L2}(t)$ 在 t_{off} 阶

段的瞬时表达式为:

$$i_{L2}(t) = e^{\alpha(t-t_1)} \left(1 + \frac{R_C}{R} \right) \cdot \left[\left(\alpha Ck_4 - \beta Ck_3 + \frac{k_4(L + CRR_C)}{L(R + R_C)} \right) \cdot (\sin \beta(t-t_1) + \left(\alpha Ck_3 + \beta Ck_4 + \frac{k_3(L + CRR_C)}{L(R + R_C)} \right) \cos \beta(t-t_1) \right] \quad (10)$$

由图 3 知输出电压在 t_{11} 与 t_{22} 处取极值,因此,对式(6)和式(9)求导数并令其等于零可得极值点时刻为:

$$\begin{cases} t_{11} = -\frac{1}{\beta} \arctg \frac{\alpha k_1 + \beta k_2}{\alpha k_2 - \beta k_1} \\ t_{22} = t_1 - \frac{1}{\beta} \arctg \frac{\alpha k_3 + \beta k_4}{\alpha k_4 - \beta k_3} \end{cases} \quad (11)$$

由以上分析可得, Buck 变换器工作在 CCM 且欠阻尼状态时输出电压纹波 V_{pp} 为:

$$V_{PP}^{CCM} = e^{\alpha(t_{22}-t_1)} [k_3 \cos \beta(t_{22}-t_1) + k_4 \sin \beta(t_{22}-t_1)] - e^{\alpha t_{11}} (k_1 \cos \beta t_{11} + k_2 \sin \beta t_{11}) - V_i \quad (12)$$

分析式(12)可知,工作在 CCM 且欠阻尼状态的 Buck 变换器纹波电压与负载电阻 R 和 R_C 有关,且呈现出非线性特征。

2 仿真与实验验证

2.1 仿真分析

由第 2 节纹波电压建模结果可知,滤波电容的等效串联电阻 R_C 对 Buck 变换器输出纹波电压有影响。下面就 R_C 对变换器纹波电压的影响情况利用 PSIM9.1 软件进行仿真分析。Buck 变换器参数如表 1 所示。

表 1 Buck 变换器参数

Tab. 1 Parameters of Buck converter

名称	参数
输入电压 V_i/V	30
占空比	0.5
负载电阻 R/Ω	10
开关频率 f/kHz	10
电感 $L/\mu H$	2 000
电容 $C/\mu F$	16

为了方便分析 R_C 对纹波电压影响情况,选择 R_C 分别为 0.5Ω 、 1Ω 、 1.5Ω 和 2Ω 进行仿真分析,此时变换器工作在欠阻尼状态,仿真结果如图 4 所示。

当 $R = 10 \Omega$ 时,根据现有的纹波电压计算公式(1)可得 Buck 变换器纹波电压 V_{pp} 为 293 mV;由公式(12)可计算出 R_C 分别为 0.5Ω 、 1Ω 、 1.5Ω 和 2Ω 时对

应的纹波电压 V_{pp} 依次为 308 mV、384 mV、515 mV、649 mV；由图 4 仿真结果可看出，此时纹波电压 V_{pp} 依次为 309 mV、385 mV、516 mV、650 mV；分析以上仿真和理论计算结果可知，当负载电阻 R 不变时，Buck 变换器纹波电压随着 ESR 的增大而增大。现有的纹波电压理论计算公式(1)未能体现出 ESR 的影响情况，当 ESR 较大时，公式(1)的理论计算值和仿真结果相差非常大；例如当 R_c 为 2 Ω 时，纹波电压仿真结果为 649 mV，而传统理论计算结果仅为 293 mV，二者结果相差达到 2 倍以上。

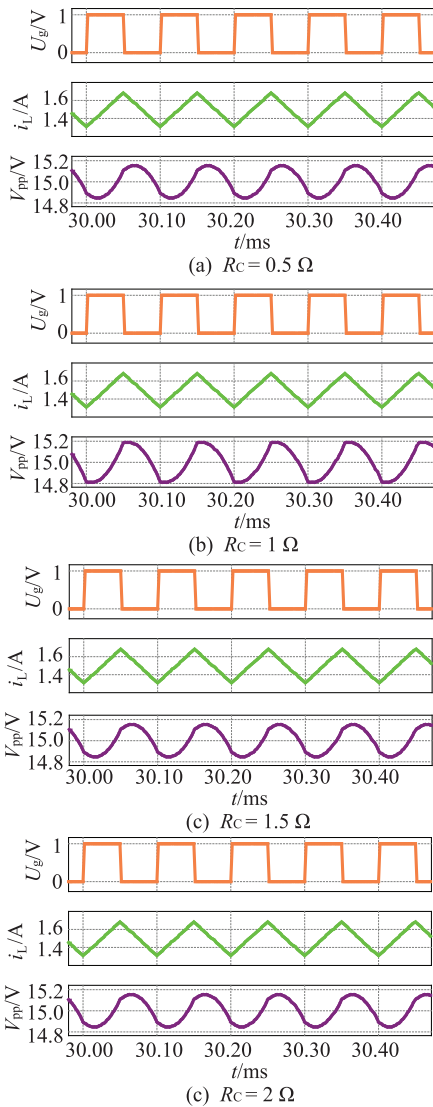


图 4 不同 ESR 的纹波电压仿真波形
Fig. 4 Simulation waveforms of ripple voltage with different ESR

由以上分析可看出，寄生参数 ESR 对纹波电压的精度有非常大的影响，尤其当开关电源选择的电解电

容的 ESR 较大时，ESR 对纹波电压影响就不能忽略。因此要实现高精度 Buck 变换器纹波电压的精确分析须考虑寄生参数 ESR 的影响情况。

2.2 实验分析

为了进一步验证本文提出的纹波电压分析方法的正确性，搭建了实验测试平台如图 5 所示。实验参数见表 1，控制器为 SG3525，功率开关管为 SPW17N80C3，功率二极管为 STPS20200CT。

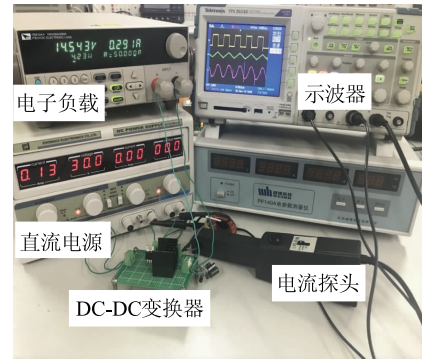
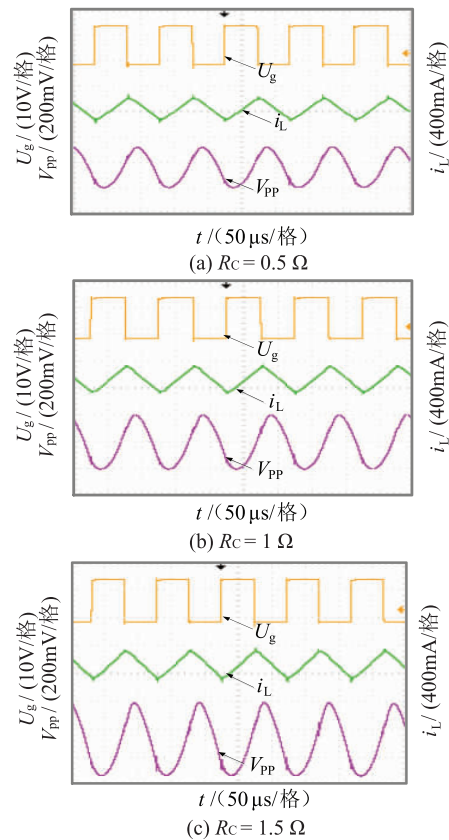


图 5 实验平台实物图
Fig. 5 Photo of experimental platform

滤波电容的寄生参数 ESR 分别为 0.5 Ω 、1 Ω 、1.5 Ω 和 2 Ω 时，Buck 变换器纹波电压实验结果如图 6 所示。



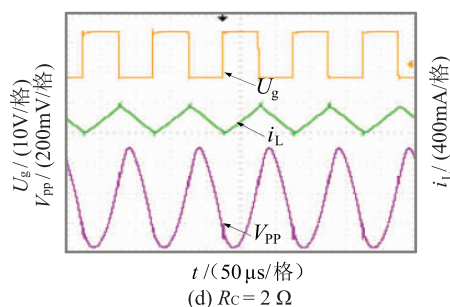


图6 纹波电压实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms of ripple voltage

分析图6可知,当电容的ESR分别为 0.5Ω 、 1Ω 、 1.5Ω 和 2Ω 时,实验测试的纹波电压 V_{pp} 依次为320mV、400mV、530mV和670mV;采用公式(1)计算可得纹波电压为293mV;而由公式(12)可计算出的纹波电压 V_{pp} 依次为308mV、384mV、515mV、649mV;比较以上纹波电压结果可知,提出的纹波电压的理论计算结果和实验结果的误差精度小于3%;理论结果和仿真结果的误差精度小于1%;当ESR较大时,实验结果是现有纹波电压理论计算结果的2倍以上,显然本文的建模方法具有更高的精度。本文提出的纹波电压建模方法有效地提高了Buck变换器输出纹波电压的精度。

3 结束语

纹波电压的精确建模是高精度Buck变换器分析与设计的理论基础。本文针对传统纹波电压分析的不足之处,提出了完善和新的方法,通过仿真和实验验证了以下结论:

(1)电容的等效串联电阻ESR对Buck变换器纹波电压的精度有较大影响,为了提高纹波电压分析精度,建模须考虑ESR对纹波电压的影响;

(2)提出的纹波电压建模方法不仅反映了Buck开关变换器非线性本质特征,而且纹波电压数学模型计算结果更接近实验结果,具有较高的精度;同时该方法具有通用性,可为其他开关变换器的纹波电压精确分析提供理论依据。

参考文献

- [1] Yi Liu, Xiaoming Zha, Jinwu Gong. Reliability-Oriented Optimization of the LC Filter in a Buck DC-DC Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6323-6337.
- [2] Zhou G, Xu J, Wang J. Constant frequency peak ripple based control of buck converter in CCM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1280-1291.
- [3] J Sun. Characterization and performance comparison of ripple-based control for voltage regulator modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(2): 346-353.

- [4] Richard Redl, Jian Sun. Ripple-Based Control of Switching Regulators- An Overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2669-2680.
- [5] Femia N, Vitelli M. Time-domain analysis of switching converters based on a discrete-time transition model of the spectral coefficients of state variables[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 2003, 50(11): 1447-1460.
- [6] Wang J, Bao B, Xu J, et al. Dynamical effects of equivalent series resistance of output capacitor in constant on-time controlled Buck converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 1759-1768.
- [7] Chen W C, Wang C S, Su Y P, et al. Reduction of equivalent series inductor effect in delay-ripple reshaped constant on-time control for buck converter with multilayer ceramic capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2366-2376.
- [8] 刘树林, 刘健. 开关变换器分析与设计[M]. 机械工业出版社, 2010.
- [9] Liu Shulin, Liu Jian, Yang Yinling, et al. Energy Transmission Modes and Output Ripple Voltage of Boost Converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 119-124.
- [10] 刘树林, 刘健, 寇蕾, 等. Buck DC/DC 变换器的输出纹波电压分析及其应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 91-97.
Liu Shulin, Liu Jian, Kou Lei, et al. Analysis of Output Ripple Voltage of Buck DC/DC Converter and Its Application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 91-97.
- [11] 董帅, 张千帆, 王睿, 等. SVPWM 控制时双向 Z 源逆变器电容电压纹波分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(24): 107-114.
Dong Shuai, Zhang Qianfan, Wang Rui, et al. Analysis of Capacitor Voltage Ripple for Bi-Directional Z-Source Inverters Based on SVPWM [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 107-114.
- [12] 殷晓东, 罗登, 李祖勇, 等. 一种双向隔离 DC-DC 变换器二次纹波电压抑制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1356-1363.
Yin Xiaodong, Luo Deng, Li Zuyong, et al. A Second-order Ripple Voltage Suppression Algorithm of Bidirectional Isolation DC-DC Converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1356-1363.

作者简介:



皇金锋(1978—),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为开关变换器的分析与设计。
Email: jfhuang2000@163.com

李林鸿(1992—),男,硕士研究生,研究方向为开关变换器的分析与设计。Email: soarllh@163.com

李良井(1993—),男,硕士研究生,研究方向为开关变换器的分析与设计。Email: llj1767@163.com

收稿日期:2019-02-25;修回日期:2019-04-19

(王艳丽 编发)